

# 탄소나노튜브 기반 복합 섬유 연구 동향



김현수

- 2015. 한양대학교 생체공학과(학사)
- 2021. 한양대학교 생체공학과(박사)
- 2021-현재. 한국생산기술연구원 융합기술 연구소 섬유연구부 연구원



장성진

- 2012. 호서대학교 전자공학과(학사)
- 2014. 호서대학교 전자공학과(석사)
- 2014-현재. 한국생산기술연구원 융합기술 연구소 섬유연구부 연구원

## 1. 서 론

1991년 Iijima Sumio가 탄소원자로 구성된 나노 크기의 원통 구조를 갖는 탄소나노튜브를 처음으로 발표했다. 이후, 탄소나노튜브의 물성은 강철의 100배 수준으로 강하고, 구리처럼 높은 전기 전도성을 가진다는 것이 알려지면서 꿈의 소재라고 불리기 시작하였다. 탄소나노튜브는 다양한 방법, 형태로 현재까지 활발한 연구가 진행되고 있으며, 초기에는 주로 분말 형태의 탄소나노튜브를 고분자나 세라믹 등과 혼합하여 강도 향상, 전기전도도 향상 등을 위한 보강제로써의 응용연구가 진행되었다. 이후, 탄소나노튜브를 필름이나 섬유형태의 유연소재에 적용하는 기술이 나오면서 탄소나노튜브의 응용 범위가 웨어러블 기술까지 확대되었다. 탄소나노튜브의 필름 및 섬유화는 기존의 탄소섬유보다 우수한 물성을 가진 복합소재로 활용할 수 있고, 특히 탄소나노튜브 복합 섬유는 에너지 저장, 에너지 수확, 인공근육, 고강도 섬유 등을 가능하게 하여 웨어러블 적용 주요 소재로서 주목받고 있다.

그러나 탄소나노튜브 기반 복합 섬유의 개발에는 여러 가지 문제점이 있다. 첫째는 탄소나노튜브의 높은 가격이다. 탄소나노튜브의 합성에는 여러 방법이 있지만 까다로운 합성 조건으로 인해 일정한 품질의 탄소나노튜브를 대량으로 합성하기가 어렵다. 둘째는 탄소나노튜브와 다른 소재를 복합했을 때 섬유의 기계적 물성과 기능성 모두를 가지기 어렵다는 것이다. 섬유의 복합 기술은 복합 비율과 내부 구조에 따라 물성과 성능이 민감하게 반응하기 때문에 많은 시행착오가 요구되는 기술이다.

본 논고에서는 탄소나노튜브를 기반으로 하는 복합 섬유에 대한 연구 결과와 동향을 살피고, 국내 섬유학계가 나아가야 하는 방향에 대해 제시해 보고자 한다.

## 2. 탄소나노튜브 섬유

### 2.1. 탄소나노튜브 섬유

탄소나노튜브는 연소과정에서 자연적으로 생성될 수 있다. 하지만 자연적인 방법으로는 상업적 생산과는 거리

가 멀기에 탄소나노튜브만 합성하는 여러 방법이 연구되었다. 대표적인 방법으로 아크방전법 (arc discharge method), 화학기상증착법 (chemical vapor deposition)이 있다. 그 외의 합성 방법으로 레이저증착법, 기상성장법, 화염합성법이 있다 [1-3].

아크방전법은 음극/양극에 위치한 탄소막대에 아크를 발생시키는 방법으로 탄소나노튜브의 합성에 사용된 가장 초기의 방법이다. 비교적 다른 합성 방법보다 간단한지만 순도가 낮다는 단점이 있기 때문에 추가적인 정제 과정이 필요하다. 아크방전법으로 합성된 탄소나노튜브는 파우더 형태로 복합소재 재료의 물성 향상이나 전극소재로 주로 사용된다. 화학기상증착법은 챔버 안에서 촉매가 코팅된 Si기판을 600~800 °C로 탄화수소 (아세틸렌, 메탄, 에탄올 등)를 불활성 기체와 함께 반응시킴으로써 Si 기판 위에 10~50 nm 사이 직경의 다중벽 탄소나노튜브가 합성된다. Si 기판 위에서 합성되는 탄소나노튜브는 밑에서 위로 성장하면서 합성된다. 이렇게 합성된 탄소나노튜브는 기판위에 가득 채워지게 되고 숲처럼 생겼기에 탄소나노튜브 forest라고 불린다.

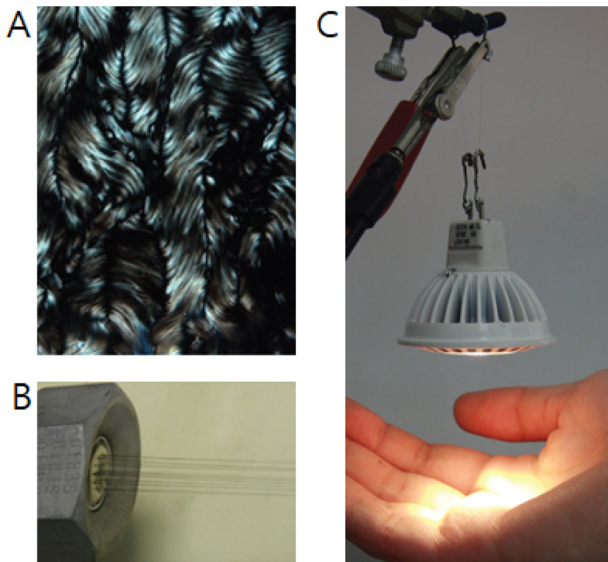


Figure 1. 탄소나노튜브 섬유 습식방사. (A) 탄소나노튜브가 chlorosulfonic acid(CSA)에 분산되어 액정 특성이 나타난 편광현미경 사진. (B) 습식방사법으로 탄소나노튜브가 방사되는 모습. (C) 46g의 발광다이오드를 24  $\mu\text{m}$  직경의 탄소나노튜브 섬유 2가닥으로 매달린 모습.

이렇게 여러 방법으로 합성된 탄소나노튜브는 크게 3가지 방법으로 섬유화할 수 있다. 가장 널리 사용되는 탄소나노튜브 섬유화는 습식방사법을 이용한 방법으로 탄소나노투

브 파우더를 합성하는 모든 합성 방법에서 제조가 가능하다. 습식방사법은 탄소나노튜브 분산액을 방사노출기로 응고욕에 주입하여 연속적으로 방사하는 방식이다. 습식방사로 탄소나노튜브 섬유를 방사하려면, 소수성을 가지는 탄소나노튜브를 용매에 잘 분산되도록 처리를 해야 한다. 소수성인 탄소나노튜브를 용매에 분산되도록 계면활성제를 첨가하거나, 탄소나노튜브를 화학 처리하여 친수성을 가지도록 기능을 붙여 분산시킨다. 화학적으로 처리된 분산액이 방사노출기를 통해 응고욕에 방사되면 섬유 형태로 응고되면서 섬유 형태를 가진다. 그러나 계면활성제나, 화학처리로 인해 탄소나노튜브의 물리적 특성 (기계적 강도, 전기전도도 등)이 저하되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 미국의 Rice University의 Pasquali 연구소에서 계면활성제나 화학처리 없이 탄소나노튜브를 분산하여 습식방사하는 기술을 보여주었다 [4]. Pasquali 연구소는 초강산인 chlorosulfonic acid (CSA)에서 탄소나노튜브가 배열되어 액정상태로 분산되는 것을 발견하였고 (Figure 1A), CSA에 분산된 탄소나노튜브를 습식 방사하여 순수 탄소나노튜브로 이루어진 섬유를 제조에 성공하였다 (Figure 1B). 이렇게 만들어진 탄소나노튜브 섬유는 Figure 1C에서 보이는 것처럼 우수한 기계적 강도뿐만 아니라 높은 전기 전도성을 보였다.

화학기상증착법으로 합성된 탄소나노튜브 forest는 분산액으로 습식방사하는 방법 외에 건식 방법으로 탄소나노튜브 섬유를 제조할 수 있으며, 최근에 많이 사용되는 방법이다 [5,6]. 높은 밀도를 가지는 탄소나노튜브 forest는 탄소나노튜브 사이 거리가 짧아 탄소나노튜브 forest의 끝을 잡아당기면, 반테르발스 힘이 작용하여 탄소나노튜브끼리 연속적으로 끌어 당겨져 배열된 시트 형태를 형성한다 (Figure 2A). 이렇게 형성된 탄소나노튜브 시트를 회전 모터로 꼬아 주게 되면 꼬임 구조를 가지는 탄소나노튜브 섬유가 된다 (Figure 2B). 이 섬유는 forest에서 잡아당길 때 폭 또는 시트의 겹 수에 따라 섬유의

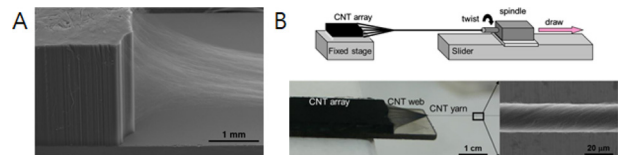


Figure 2. (A) 화학기상증착법으로 합성된 높이 2 mm의 탄소나노튜브 forest 및 방사되는 전자현미경 사진 [6]. (B) 탄소나노튜브 forest에서 방사되는 탄소나노튜브 시트를 회전 모터를 사용하여 섬유로 제조하는 과정 및 탄소나노튜브 섬유의 전자현미경 사진 [6].

직경을 조절할 수 있다. 또한, 탄소나노튜브 섬유의 강도는 합성된 탄소나노튜브의 길이에 따라 크게 달라진다. 탄소나노튜브의 길이가 길수록 섬유의 강도는 높아지며, 길이가 약 2 mm 일 때 1,068 MPa의 인장강도를 가진다 [6]. 전기 전도성은 합성된 탄소나노튜브의 결정화도에 따르며  $10^2 \sim 10^3 S/cm$  사이이다. 탄소나노튜브 forest에서 제조되는 섬유는 직경에 대한 자유도와 기능성 부여에 장점을 가지지만, 한정된 기판에서 섬유를 방사하기 때문에 대량생산이 어렵다.

최근 탄소나노튜브 섬유의 생산 방법으로 주목받고 있는 기술이 있다. 화학기상증착법을 응용한 기술로 고온 가열로에서 탄소나노튜브의 합성과 동시에 섬유를 방사하는 직접방사법이다 (Figure 3A) [7-10]. 가열로 끝에서 촉매와 탄화수소를 동시에 분사하면 촉매에서 탄소나노튜브가 합성되고 이들이 뭉쳐 흐르게 되고 오픈된 한쪽 끝에서 나오는 것을 꼬아 섬유 형태로 만든다 (Figure 3B,C) [8]. 직접방사법은 연속적으로 탄소나노튜브 섬유를 대량생산 가능하기 때문에 산업화에 가장 가까운 기술이다 (Figure 3D). 하지만, 섬유 내부에 촉매가 포함되어있는 문제점이 있어 후처리 기술이 해결이 되어야만 한다.

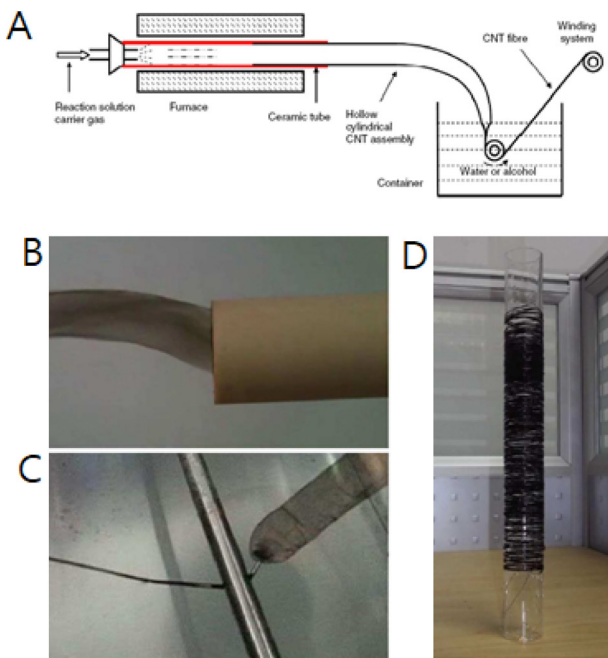


Figure 3. 직접 방사를 통한 탄소나노튜브 섬유 합성 과정 [8]. (A) 가열로에 합성을 위한 용액 및 가스를 흘려주면서 연속적으로 탄소나노튜브를 합성하고 응집화하여 섬유로 제조하는 과정을 나타낸 그림. (B) 가열로에서 합성되어 방사되고 응집화 되기 전 탄소나노튜브 모습. (C) 탄소나노튜브를 알코올 용액으로 응집화 시키는 모습. (D) 탄소나노튜브 섬유가 유리 튜브에 대량으로 감겨진 모습.

## 2.2. 탄소나노튜브 복합 섬유

탄소나노튜브 복합 섬유 연구에는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는, 탄소나노튜브는 고가이며, 섬유화 과정이 어렵다는 문제가 있기 때문에 고분자와 복합하여 탄소나노튜브의 장점을 유지하면서 비용을 낮출수 있는 방법이 연구되고 있다. 탄소나노튜브 복합 섬유는 polyacrylonitrile (PAN) 고분자를 이용한 연구가 초기에 진행되었다. PAN 고분자는 탄소섬유의 기반이 되는 고분자로 탄화를 거치면서 높은 강도 및 탄성률을 얻을 수 있다. PAN 기반 탄소섬유와 비교하여 탄소나노튜브/PAN을 복합하여 탄화된 섬유는 강도 및 탄성률이 각각 46%, 37%가 향상된 연구가 보고된 바 있으며 (Figure 4A,B)[11], 이 연구를 통해 탄소나노튜브를 복합함으로써 PAN 기반 탄소섬유의 취약한 탄성률을 높이는데 효과적임을 알게 되었다. 최근, 한국과학기술연구원 (KIST)와 울산과학기술원 (UNIST) 공동 연구팀이 탄소나노튜브와 폴리이미드를 이용해 강도와 탄성률을 높은 탄소나노튜브 복합 탄소섬유를 보고했다 [12]. 이들은 습식방사공정을 이용해 탄소나노튜브와 폴리이미드의 복합 섬유를 제조한 후, 고온 열처리하여 강도 (6.2 GPa)를 유지하면서 높은 탄성률 (700 GPa)을 가지는 섬유를 제조하는데 성공하였다 (Figure 4C-E). 이는 기존에 상용화된 탄소섬유의 탄성률의 1.6배 수준이며, 탄소나노튜브를 저가의 폴리이미드로 최대 50%까지 대체함으로써 제조비용 절감이 가능함을 확인하였다.

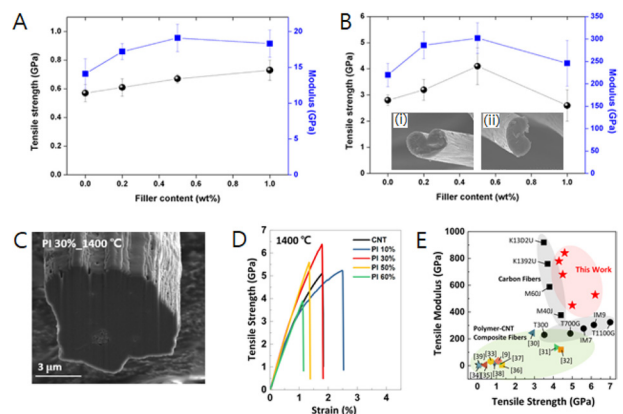


Figure 4. 습식방사법으로 제조된 탄소나노튜브 복합 섬유 성능. 탄소나노튜브 함량에 따른 (A) PAN-탄소나노튜브 복합 섬유 인장 강도 및 탄성률 및 (B) 탄화 후의 인장 강도 및 탄성률, 폴리이미드-탄소나노튜브 복합 섬유 [11]. (C) 30% 폴리이미드가 함유된 탄소나노튜브 복합 섬유의 단면 전자현미경 사진. (D) 폴리이미드-탄소나노튜브 함량에 따른 인장-강도 그래프 및 (E) 기타 복합 섬유와의 강도-탄성률 비교 그래프 [12].



두 번째로 탄소나노튜브 복합 섬유 연구는, 산업화의 초기 단계인 탄소나노튜브 기반 섬유에 기능성을 부여하는 연구가 주로 진행되고 있다. 탄소나노튜브 섬유는 전도성과 우수한 물성을 동시에 가지고 있기 때문에 웨어러블 디바이스 소재로서 큰 장점을 가지고 있어, 에너지저장 및 하베스팅, 배터리 섬유, 그리고 인공근육 분야 등 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 탄소나노튜브 섬유의 기능성 부여는 biscrolling 방법과 섬유 표면처리 방법이 많이 쓰인다 [13]. Biscrolling 방법은 탄소나노튜브 forest에서 얻을 수 있는 탄소나노튜브 시트에 활물질을 코팅하고 이를 꼬아 섬유를 제조하는 방법이다 (Figure 5A) [14]. Biscrolling 방법은 사용하는 활물질의 종류에 따라 다양한 기능성을 부여할 수 있는 장점을 가지고 있다. 한양대학교와 미국 텍사스 대학교의 공동연구팀은 biscrolling 방법을 통해 슈퍼커패시터, 배터리, 에너지 하베스터, 인공근육 등 다양한 기능성을 가지는 탄소나노튜브 복합 섬유를 보고 했다 (Figure 5B-D) [15-16]. 하지만, biscrolling 방법은 활물질의 특성을 극대화시킬 수 있는 구조를 가지지만, 섬유 내부에 물질이 포함되어 발생하는 기계적 강도 하락 문제를 해결해야 한다.

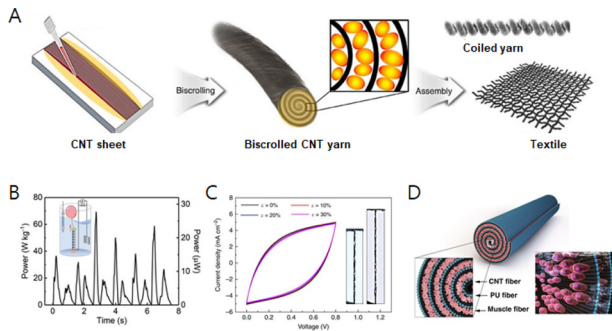


Figure 5. (A) 탄소나노튜브 forest에서 방사한 시트에 활물질을 뿌리고 biscrolling하는 과정을 나타낸 그림 [14]. (B) 그래핀을 biscrolling 방법으로 포함시키고 코일 구조 섬유로 제조한 후 에너지하베스팅으로 응용한 성능 그래프. 코일 구조의 탄소나노튜브 섬유를 잡아당기면 내부 커패시턴스 차이를 이용한 에너지 하베스터이다 [15]. (C) 활물질  $MnO_2$ 를 biscrolling 고성능 슈퍼커패시터를 구현한 에너지 저장 섬유 [14]. (D) 근세포와 폴리우레탄을 biscrolling하여 바이오 인공근육으로 응용한 사례 [16].

기계적 강도에 취약한 biscrolling 방법을 대체하는 방법으로 탄소나노튜브 섬유에 코팅하는 방법이 쓰인다. 제조된 탄소나노튜브 섬유에 침지방법이나 전기화학증착법을 이용해 원하는 기능성 소재를 코팅함으로써 간단하게 기능성을 부여하는 방법이다. 이러한 코팅 방법은 하나의 섬유에서 layer by layer

구조를 만들 수 있으며 양극-음극을 갖는 배터리나 슈퍼커패시터를 구현할 수 있다 (Figure 6A) [17]. 비교적 biscrolling 방법보다 간단하며 대량생산의 가능성이 있는 방법이지만 코팅 두께의 한계 및 코팅 내구성에 대한 이슈가 남아 있다 (Figure 6B) [18]. 최근, biscrolling과 코팅 방법의 단점을 보완한 연구 결과를 한국재료연구원과 인하대학교 공동연구 그룹에서 보고하였다 [19]. 직접방사법으로 제조된 탄소나노튜브에 표면처리하고 다공성 탄소를 성장시키는 방법으로 에너지저장 기능 향상과 동시에 높은 내구성 및 강도를 유지하는 슈퍼커패시터 섬유를 제조하였다 (Figure 6C). 이러한 기술은 경량, 성능, 강도 특성이 요구되는 다양한 분야 (우주항공, 국방, 바이오, 패션 등)에 활용을 기대할 수 있다.

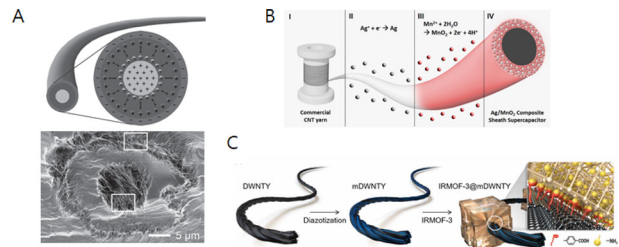


Figure 6. (A) 탄소나노튜브 섬유(탄소나노튜브 forest에서 제조) 위에 layer by layer 구조로 일체형 음극-양극을 구현한 에너지 저장 응용 탄소나노튜브 섬유 [17]. (B) 탄소나노튜브 섬유(탄소나노튜브 forest에서 제조) 표면에 전기화학증착법으로 활물질을 코팅하는 방식을 이용한 섬유 [18]. (C) 직접 방사법으로 합성된 탄소나노튜브 섬유에 표면처리하고 다공성 탄소를 성장시키는 방법으로 강도 및 에너지저장 성능을 가지는 복합 섬유 제조 과정을 나타낸 그림 [19].

### 3. 탄소나노튜브 섬유 산업화 동향

탄소나노튜브 기반 복합 섬유는 해결해야 할 이슈(강도, 내구성, 대량생산 등)가 많이 남아 있기 때문에 현재는 연구 개발 단계이다. 현재는 탄소나노튜브 섬유 생산의 산업화가 초기 단계에 있다. 국내 및 일본에서는 연구용으로 탄소나노튜브 forest를 몇 기업에서 판매하고 있으며, 직접방사를 통한 탄소나노튜브 섬유는 연구소에서 쓰이는 기술로 아직까지 국내 기업체에서 생산되고 판매되는 곳은 없다. 미국에서는 두 기업에서 탄소나노튜브 섬유 생산 및 상품화 단계에 있다. 미국의 Dexmat는 습식방사법으로 탄소나노튜브 섬유를 제조하고 있으며 단섬유, 실, 직조 필름 형태 등 다양한 형태로 판매하고 있다 (Figure 7A) [20]. 또한, 스포츠 의류, 자동차, 우주항공, 국방 등 다양한 분야에서 응용하기 위해

노력하고 있다. 미국의 Huntsman에서는 직접방사법으로 제조하고 있으며 대량생산 기술을 보유하고 있고 마찬가지로 항공우주, 자동차, 전기전자, 에너지 분야에 대한 응용 산업을 진행 중이다 (Figure 7B) [21].

탄소나노튜브 섬유는 차세대 섬유로 항공우주, 국방 소재로 중요한 역할을 하는 소재이기 때문에, Dexmat, Huntsman사는 국내외에 탄소나노튜브 섬유의 판매를 제한하고 있다. 그만큼 미국에서는 보호해야 하는 소재기술로 자리 잡고 있으며 탄소나노튜브 섬유 및 복합 섬유 연구 또한 활발하게 진행되고 있다.

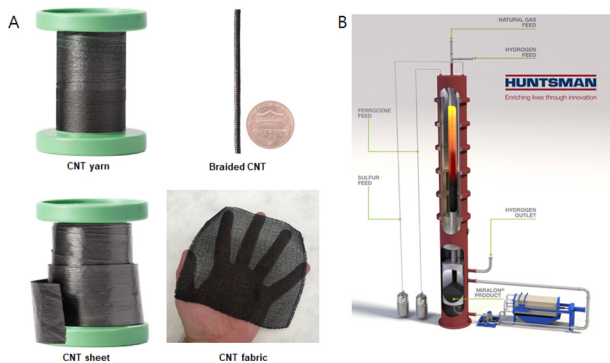


Figure 7. (A) 미국 Dexmat 기업에서 판매하고 있는 습식방사법으로 제조된 탄소나노튜브 실, braid 실, 필름, 직물 [20]. (B) 미국 Huntsman에서 제시하는 메탄을 이용한 직접 방사식 친환경 탄소나노튜브 섬유 합성 장비를 나타낸 그림 [21].

#### 4. 결 론

본고에서는 탄소나노튜브 섬유 제조 및 복합 섬유 응용에 대한 연구 동향을 살펴보았다. 탄소나노튜브 복합 섬유는 탄소나노튜브 합성 방식에 따라 복합 방법이 달라지고 성능이 크게 달라진다. 따라서 응용 분야에 따라 탄소나노튜브 섬유를 선택적으로 사용하는 것이 중요하다. 탄소나노튜브 forest에서 제조되는 섬유는 성능을 극대화시킬 수 있는 반면 기계적 강도를 잃게 되며, 직접 방사로 제조된 탄소나노튜브 섬유는 낮은 성능 대신에 높은 기계적 강도와 대량생산이 가능하다. 하지만, 최근에 두 방법의 단점을 해결하는 연구보고가 있으며, 앞으로는 탄소나노튜브 복합 섬유의 기능성과 기계적 강도를 모두 충족하는 방향으로 연구가 진행될 것으로 판단된다.

탄소나노튜브 섬유의 산업화는 미국에서 습식 방사, 직접 방사법으로 생산하여 적극적으로 프로젝트를 진행하고 있다. 특히, 탄소나노튜브 섬유는 웨어러블 뿐만 아니라 우주항공,

국방 기술에 활용할 수 있는 기술로 여겨지기 때문에 국내에서도 더 많은 관심을 가질 필요가 있다. 현재는 탄소나노튜브 섬유의 양산 기술을 우선 개발해야 하며, 그 이후 기능성 복합 섬유 기술 고도화를 논의 할 수 있을 것이다. 하지만, 최근에는 탄소나노튜브 합성 연구가 활발히 진행됨에 따라 생산량과 비용이 조금씩 낮아지고 있는 추세이기 때문에 머지않아 탄소나노튜브를 기반으로 하는 섬유 및 기능성 복합 섬유의 응용 기술을 활용하는 기업이 증가될 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. Arora, N.; Sharma, N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review, *Diamond and Related Materials* 2014, 50, 135–150.
2. Guo, T.; Nikolaev, P.; Thess, A.; Colbert, D. T.; Smalley, R. E. Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization, *Chemical Physics Letters* 1995, 243, 49–54.
3. Inami, N.; Mohamed, M. A.; Shikoh, E.; Fujioka, A. Synthesis-condition dependence of carbon nanotube growth by alcohol catalytic chemical vapor deposition method, *Science and Technology of Advanced Materials* 2007, 8, 292–295.
4. Behabtu, N.; Young, C. C.; Tsentelovich, D. E.; Kleinerman, Olga.; Wang, X.; Ma, A. W. K.; Bengio, E. A.; Waarbeek, R. F.; Jong, J. J.; Hoogerwerf, R. E.; Fairchild, S. B.; Ferguson, J. B.; Maruyama B.; Kono, J.; Talmon, Y.; Cohen, Y.; Otto, M. J.; Pasquali, M. Strong, Light, Multifunctional Fibers of Carbon Nanotubes with Ultrahigh Conductivity *Science* 2013, 339, 182–185.
5. Lepró, X.; Lima, M. D.; Baughman, R. H.; Spinnable carbon nanotube forest grown on thin, flexible metallic substrates, *Carbon* 2010, 48, 3621–3627.
6. Ghemes, A.; Minami, Y.; Muramatsu, J.; Okata, M.; Mimura, H.; Inoue, Y. Fabrication and mechanical properties of carbon nanotube yarns spun from ultra-long multi-walled carbon nanotube arrays, *Carbon* 2012, 50, 4579–4587.
7. Li, Y.-L.; Kinloch, I. A.; Windle, A. H. Direct Spinning

- of Carbon Nanotube Fibers from Chemical Vapor Deposition Synthesis, *Science* 2004, 304, 276–278.
8. Wang, J. N.; Luo, X. G.; Wu, T.; Chen, Y.; High-strength carbon nanotube fibre-like ribbon with high ductility and high electrical conductivity, *Nature Communications* 2014, 5, 3848.
  9. Jung, Y.; Song, J.; Huh, W.; Cho, D.; Jeong, Y.; Controlling the crystalline quality of carbon nanotubes with processing parameters from chemical vapor deposition synthesis, *Chemical Engineering Journal* 2013, 228, 1050–1056.
  10. Park, J. H.; Park, J.; Lee, S.-H.; Kim, S. M. Continuous synthesis of high-crystalline carbon nanotubes by controlling the configuration of the injection part in the floating catalyst chemical vapor deposition process, *Carbon Letters* 2020, 30, 613–619.
  11. Park, O.-K.; Chae, H.-S.; Park, G. Y.; You, N.-H.; Lee, S.; Bang, Y. H.; Hui, D.; Ku, B.-C.; Lee, J. H. Effect of functional group of carbon nanotubes on mechanical properties of carbon fibers, *Composites Part B* 2015, 76, 159–166.
  12. Kim, S. G.; Heo, S. J.; Kim, S.; Kim, J.; Kim, S. O.; Lee, D.; Lee, S.; Kim, J.; You, N.-H.; Kim, M.; Kim, H. C.; Chae, H. G.; Ku, B.-C.; Ultrahigh strength and modulus of polyimide-carbon nanotube based carbon and graphitic fibers with superior electrical and thermal conductivities for advanced composite applications, *Composites Part B* 2022, 247, 110342.
  13. Lima, M.; Fang, S.; Lepró, X.; Lewis, C.; Robles-O., R.; González-C., J.; Martínez-C., E.; Kozlov, M. E.; Oh, J.; Rawat, N.; Haines, C. S.; Haque, M. H.; Aare, V.; Stoughton, S.; Zakhidov, A. A.; Baughman, R. H.; Biscrolling Nanotube Sheets and Functional Guest into Yarns, *Science* 2011, 331, 51–55.
  14. Choi, C.; Kim, K. M.; Kim, K. J.; Lepró, X.; Spinks, G. M.; Baughman, R. H.; Kim, S. J. Improvement of system capacitance via weavable superelastic biscrolled yarn supercapacitors, *Nature Communications* 2016, 7, 13811.
  15. Wang, Z.; Mun, T. J.; Machado, F. M.; Moon, J. H.; Fang, S.; Aliev, A. E.; Zhang, M.; Cai, W.; Mu, J.; Hyeon, J. S.; Park, J. W.; Conlin, P.; Cho, K.; Gao, E.; Wan, G.; Huynh, C.; Zakhidov, A. A.; Kim, S. J.; Baughman, R. H. More Powerful Twistron Carbon Nanotube Yarn Mechanical Energy Harvesters, *Advanced Materials* 2022, 34, 2201826.
  16. Jang, Y.; Kim, S. M.; Kim, E.; Lee, D. Y.; Kang, D. M.; Kim, S. J. Biomimetic cell-actuated artificial muscle with nanofibrous bundles, *Microsystems & Nanoengineering* 2021, 7, 70.
  17. Chen, X.; Qiu, L.; Ren, J.; Guan, G.; Lin, H.; Zhang, Z.; Chen, P.; Wang, Y.; Peng, H. Novel Electric Double-Layer Capacitor with a Coaxial Fiber Structure, *Advanced Materials* 2013, 25, 6436–6441.
  18. Kim, J. H.; Choi, C.; Lee, J. M.; Andrade, M. J.; Baughman, R. H.; Kim, S. J. Ag/MnO<sub>2</sub> Composite Sheath-Core Structured Yarn Supercapacitors, *Scientific Reports* 2018, 8, 813309.
  19. Na, Y. W.; Cheon, J. Y.; Kim, J. H.; Jung, Y.; Lee, K.; Park, J. S.; Park, J. Y.; Song, K. S.; Lee, S. B.; Kim, T.; Yang, S. J. All-in-one flexible supercapacitor with ultrastable performance under extreme load, *Science Advances* 2022, 8, eabl8631.
  20. Dexmat, <https://dexmat.com/>
  21. Huntsman International LLC., <https://www.huntsman.com/>